

Terner elegyek szakaszos nyomásváltó desztillációs elválaszthatóságának vizsgálata

Feasibility of separation of ternary mixtures by pressure swing batch distillation

Modla G., Láng P., Kopasz Á.

BME Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék

1521 Budapest, Műegyetem rkp. 3-5

Summary

Feasibility of the pressure swing batch distillation separation of ternary homoazeotropic mixtures in different single and double column configurations was investigated by assuming maximal separation. Feasibility regions where the ternary mixture can be separated into its pure components (by applying in at least one step pressure swing) and the separation steps for different configurations are determined. The method was presented for the most frequent types of ternary mixtures with minimum azeotrope(s).

The most frequent types of ternary mixtures were investigated. We studied 5 types of mixture by the classification of Serafimov corresponding to 11 different types of mixture by the classification of Nishimura and Matsuyama (N&M), and 41 different cases by the extended N&M classification taking into account the pressure sensitivity of the azeotropes, as well. From these 41 cases studied

- in 14 cases the whole area of the composition triangle proves feasible,
- in 15 cases in the triangle there is at least one region where the separation is feasible,
- in 12 cases there is no feasible area within the interior of the triangle.

We stated that, the composition triangle contains a feasible part only if

- both the azeotrope which is unstable node and
 - the separatrice(s) between stable node(s) and saddle(s)
- are pressure sensitive.

Moreover we concluded that if the cuts of a BR/BS region are only pure component(s) and/or pressure sensitive binary azeotrope(s) this region is feasible.

On the basis of results we concluded that

If cuts of a BR or BS region are pure component(s) and/or pressure sensitive binary azeotrope(s) in this region the separation is feasible. In other words if in the cuts of the given region there is no pressure insensitive azeotrope this region is feasible (necessary and sufficient condition). If the whole area of the triangle contains only such regions the feasibility region of the separation is the whole triangle.

So far mixtures containing only minimum azeotropes were considered. However the recommended separation methods can be also applied for mixtures with maximum azeotrope(s) with the following modification. By exchanging the stable and unstable nodes the feasibility regions do not change but in the recommended separation method(s) the column configurations must be inverted: instead of BS BR and DCBS DCBR must be applied (and vice versa).

Absztrakt: Homoazeotropot tartalmazó terner elegyek nyomásváltó szakaszos desztillációval (NYVSZD) történő szétválaszthatóságát tanulmányozzuk megvalósíthatósági vizsgálatokkal. A maradékgörbe térképeket elemezzük. Meghatározzuk a megvalósítható tartomány(oka)t - ahonnan a terner elegy komponenseit tisztán visszanyerhetjük (legalább egy nyomásváltó lépést alkalmazva) - és az egyes kolonna konfigurációknál (egy és két oszlopos szakaszos sztripper és/vagy rektifikáló) alkalmazandó műveleti lépéseket. A leggyakoribb típusú, minimális azeotropot tartalmazó elegyeken mutatjuk be az eljárást.

1. Bevezetés

A *desztilláció* az egyik leggyakrabban alkalmazott szétválasztó eljárás a vegyiparban, mely a folyadékelegy komponensei illékonyságának különbségén alapul. Azeotropot tartalmazó elegyek elválasztásához valamilyen speciális desztillációs eljárást kell alkalmaznunk, mint például nyomásváltó (NYVD), extraktív vagy heteroazeotrop desztillációt.

A *szakaszos desztilláció* (SZD) mindig is fontos szerepet játszott a szezonális, bizonytalan, kis kapacitású gyártásban illetve nagy tisztaságú kémiai anyagok előállításában. Ennek a műveletnek kulcsfontosságú szerepe van a gyógyszer és számos más iparban is, valamint a hulladék oldószerek elegyek regenerálásában. A szakaszos desztilláció legfontosabb előnye a folyamatossal szemben, hogy egy egyszerű berendezéssel is sokféle elegy kezelhető. Még többkomponensű rendszerek is szétválaszthatók egyetlen oszlopban.

Számos elegy képez olyan azeotropot, melynek összetétele változik a rendszer nyomásának megváltoztatásával, ezek a *nyomásérzékeny azeotropok*. Lewis (1928) volt az első, aki javaslatot tett az azeotrop elegyek *nyomásváltó desztillációjára*. Ezt az eljárást ajánlotta még pl. Black(1980); Abu-Eshah és Luyben(1985); Chang és Shis(1989) is.

Knapp és Doherty (1992) kifejlesztettek egy olyan új eljárást, melyben a *nyomásváltó folyamatos desztillációt hordozó hozzáadásával* kombinálták. A hordozó alkalmazása nagymértékben megnöveli a művelettel szétválasztható binér azeotrop elegyek számát.

Phimister és Seider (2000) egy minimális forrpontú nyomásérzékeny azeotrop elegy elválasztását vizsgálta *fél-folyamatos nyomásváltó desztillációval*.

Repke és munkatársai (2007) egy minimális forrpontú homoazeotrop elegy (acetonitril-víz) szétválasztását vizsgálták nyomásváltó desztillációval szakaszos rektifikálás és sztipplés esetére. *Félüzemi mérések és részletes modellező számítások* eredményeit közölték. A szerzők célja sokkal inkább a nyomásváltó desztilláció kísérleti tanulmányozása volt, mint a művelet megvalósíthatóságának kimerítő elméleti vizsgálata.

Modla és Láng (2008a) nyomásváltó szakaszos desztilláció alkalmazásával kétkomponensű, minimális és maximális forrpontú homoazeotropok elválasztását vizsgálták megvalósíthatósági és részletes modellező számításokkal. Két új kétkolonnás (*dupla oszlopos szakaszos sztripper DOSZSZ, dupla oszlopos szakaszos rektifikáló DOSZR*) berendezést mutattak be és a különböző szakaszos kolonna konfigurációkat hasonlítottak össze. A legjobb eredményt a minimális forrpontú azeotropoknál a dupla oszlopos szakaszos sztripperrel a maximális forrpontú azeotropoknál a dupla oszlopos szakaszos rektifikáló berendezéssel érték el.

Modla és mtársai (2008c) megállapították, hogy sem a Serafimov (1970), sem a Matsuyama - Nishimura (M&N, 1977)) féle osztályozás nem megfelelő a nyomásérzékeny azeotropot tartalmazó terner elegyek besorolására. Javaslatot tettek a M&N féle csoportosítás kiegészítésére.

Modla és Láng (2008b) egy, két binér minimális azeotropot tartalmazó terner elegy (n-pentán-aceton-c-hexán) nyomásváltó szakaszos desztillációval (NYVSZD) történő szétválaszthatóságát tanulmányozták megvalósíthatósági vizsgálatokkal és részletes modellező számításokkal.

E munkánk célja a homoazeotropot tartalmazó terner elegyek nyomásváltó szakaszos desztillációval történő szétválaszthatóságának tanulmányozása megvalósíthatósági vizsgálatokkal, melyek a maradékgörbe térképek elemzésén alapulnak. Meghatározzuk a megvalósítható tartomány(oka)t - ahol a terner elegy komponenseit tisztán visszanyerhetjük (legalább egy nyomásváltó lépést alkalmazva) - és az egyes kolonna konfigurációknál (egy és két oszlopos szakaszos sztripper és/vagy rektifikáló) alkalmazandó műveleti lépéseket.

A leggyakoribb típusú, minimális forrpontú azeotropot tartalmazó elegyekre mutatjuk be az eljárást.

Először röviden ismertetjük a megvalósíthatóság vizsgálatára alkalmazott módszert, majd megvizsgáljuk a különböző háromkomponensű (terner) elegyek elválaszthatóságát.

2. Megvalósíthatósági módszer

A megvalósíthatósági vizsgálatok során maximális (tökéletes) szétválasztást tételeztünk fel. Ez a következő feltevéseket foglalja magába:

- nagy tányérszám,
- nagy reflux/visszaforralási arány,
- elhanyagolható folyadék hold-up a tányérokon,
- elhanyagolható gőz hold-up.

A módszer a (folyamatosan elvett) termékek és a tartálymaradék megvalósítható összetételének (lehetséges nyomvonalak) elemzésén alapul a két különböző nyomáson (P^1 , P^2) érvényes maradékgörbe térképeken vizsgálva.

Meghatározzuk az elválasztási lépéseket és a megvalósítható tartományokat, melyek a háromszög azon területei, ahonnan a terner elegy komponenseit tisztán visszanyerhetjük (legalább egy nyomásváltó lépést alkalmazva) akárhány desztillációs lépéssel.

Ahhoz, hogy meghatározzuk a terméksorrendet - maximális szétválasztást feltételezve - a *szakaszos desztillációs tartományokat* kell megvizsgálnunk. Ewell és Welch (1945) a szakaszos desztillációs tartományt úgy definiálták, hogy annak bármelyik pontjából kiindulva (rektifikálással) ugyanazt a terméksorrendet kapjuk. Bernot és m társai (1991) szerint a szakaszos desztillációs tartományokat a következő eljárással határozhatjuk meg a maradékgörbe- térképen:

1. Először az összetétel-háromszöget olyan tartományokra osztjuk, melyek mindegyike egy instabil csomópontot tartalmaz.

2. Ezután az így kapott tartományok mindegyikében a további határvonalakat úgy kapjuk meg, hogy az instabil csomópontot összekötjük a tartomány összes nyeregponjtjával és stabil csomópontjával.

Míthogy megvalósíthatósági tanulmányainkat nem csak szakaszos rektifikálásra, hanem szakaszos sztrippelésre is végezzük, ezért a szakaszos desztillációs tartományt *szakaszos rektifikáló tartománynak* nevezzük és bevezetjük a *szakaszos sztrippelési tartományok* fogalmát: a tartomány bármelyik pontjából kiindulva szakaszos sztrippeléssel ugyanazt a terméksorrendet kapjuk. Sztrippelés esetén a maximális szétválasztás - a nagy tányérszám mellett - nagy visszaforralási arány alkalmazását jelenti.

Nyomásérzékeny azeotropot tartalmazó terner elegyeknél azon (rektifikáló/sztrippelő tartomány) határvonalak, melyek tartalmazzák ezeket az azeotropokat, helyzete a nyomás változásával megváltozik. (Feltételezzük, hogy a határvonalak egyenesek.) Nyomásváltással a határvonalakat

átléphetjük. A két nyomáshoz tartozó határvonalak közötti területen különböző nyomásokon különböző termékeket nyerhetünk.

3. Vizsgált kolonna konfigurációk

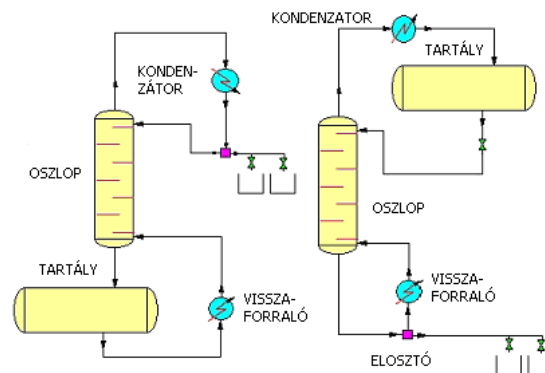
A NYVSZD egy- vagy kétkolonnás rendszerrel valósítható meg.

3.1 Egyoszlopos rendszerek

A nyomásváltás csak időben oldható meg, ezért, ahhoz, hogy a komponenseket tisztán megkapjuk, legalább két gyártási lépés szükséges. A NYVD *szakaszos rektifikálóban* vagy *szakaszos sztripperben* is megvalósítható.

A kiindulási elegyet (sarzsot) az alsó (rektifikáló, 1.a ábra) vagy felső (sztripper, 1.b ábra) tartályba töltjük be. A terméket folyamatosan vesszük el felülről (rektifikáló) vagy alulról (sztripper) a termék-gyűjtő tartályba.

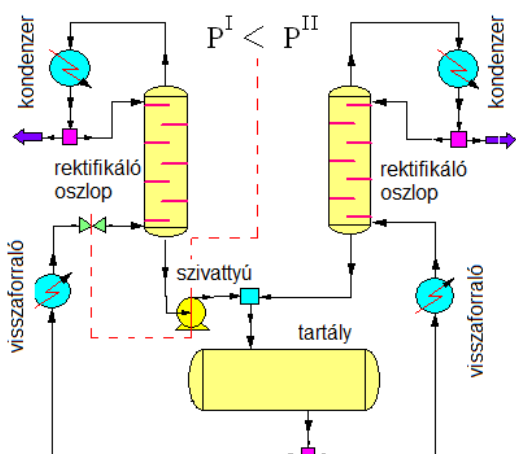
A sarzs (betáplálás) összetételétől és maradékgörbe-térkép típusától függ, hogy az egyes lépésekben tudunk-e tiszta komponenseket gyártani.



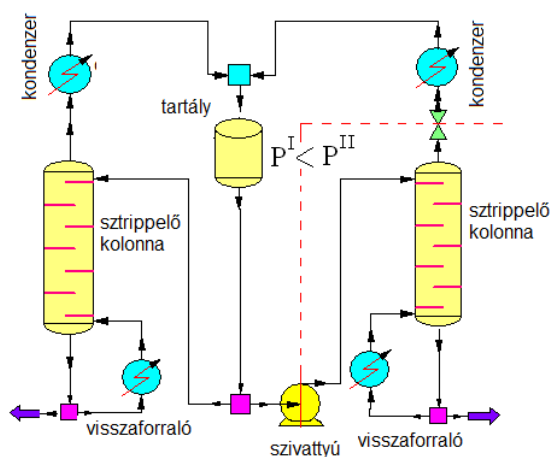
1. ábra Egy kolonnás berendezések
a) szakaszos rektifikáló b) szakaszos sztripper

3.2 Kétoszlopos konfigurációk

A kétoszlopos konfigurációk (*dupla oszlopos szakaszos rektifikáló* (DOSZR, 2.a ábra) és *dupla oszlopos szakaszos sztripper* (DOSZSZ, 2.b ábra)) egy közös tartályból és két azonos típusú (két rektifikáló (DOSZR) vagy két sztrippelő (DOSZSZ)) oszloprészből állnak, melyek különböző nyomáson üzemelnek. Az oszlopok eltérő nyomása teszi lehetővé, hogy egyszerre gyártsunk akár két tiszta komponenst is. A dupla oszlopos szakaszos rektifikáló maximális forrponjtú a dupla oszlopos szakaszos sztripper minimális forrponjtú nyomásérzékeny azeotropok elválasztására alkalmas.



a) dupla oszlopos szakaszos rektifikáló



b) dupla oszlopos szakaszos sztrippelő

2. ábra Kétoszlopos kolonna konfigurációk

4. Megvalósíthatósági vizsgálatok eredményei

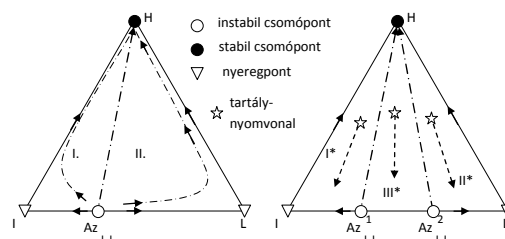
Eredményeinket a (Serafimov (1970) osztályozása szerint) két leggyakoribb típusú terner elegyre ismertetjük részletesen. Bemutatjuk az elegyek maradékgörbe térképeinek (MGT) vázlatát, meghatározzuk a szakaszos rektifikáló/sztrippelő tartományokat, a lehetséges tartály-nyomvonalakat, és javaslatot teszünk kolonna konfigurációra, valamint az elválasztás lépéseire.

4.1 1.0-1a típusú elegy elválasztása

Az eredeti maradékgörbe térkép osztálya Serafimov alapján 1.0-1a (előfordulási valószínűsége 21.6% Reshetov (1998) statisztikája szerint), N&M alapján pedig 1-0-0.

Az L-I azeotrop instabil, a H csúcs stabil csomópont (3.a ábra). Az L és I csúcsok

nyeregpontok. A maradékgörbe térkép (M&N: 1P-0-0, pl.: CCl₄-etanol+akril-sav) egyetlen egy egyszerű desztillációs tartományt tartalmaz, de két szakaszos rektifikáló (SZRT) és sztrippelő tartományból (SZSZT). Ennél az elegytípusnál a szakaszos rektifikáló és sztrippelő tartományok egybeesnek, csak a terméksorrendek fordítottak (1. táblázat).



3. ábra 1P-0-0 elegy MGT vázlata és a SZSZ tartály-nyomvonal

A nyomás változtatásával a határvonal (Az_{LI} és H közötti vonal) helyzete megváltozik, és ennek következtében szakaszos sztrippelő és szakaszos rektifikáló tartományok is megváltoznak.

Javasolt kolonna konfiguráció: szakaszos sztrippel vagy a dupla oszlopos szakaszos sztrippel (DOSZSZ).

Az elválasztás lépései:

1. H komponens gyártása:

DOSZSZ-nél csak az egyik oszlop működik, míg a tartály összetétele el nem éri az $L-I$ oldalt (3.b ábra). Ez a lépés bármelyik nyomáson (P^1 , P^2) megvalósítható, de ha a kiindulás összetétel

- az I. területen van, akkor P^2
- az II. területen van, akkor P^1

nyomást célszerű alkalmazni, mert akkor nem kell nyomást változtatni a következő lépés előtt.

2. L és I komponensek gyártása nyomásváltó desztillációval (DOSZSZ-nél mindkét oszlop működik)

Megjegyzések:

-A háromkomponensű elegy elválasztása visszavezethető kétkomponensűre.

-Ez a típusú elegy nem választható szét egy lépéssel dupla oszlopos berendezésekkel sem.

A háromszög egész területe megvalósítható.

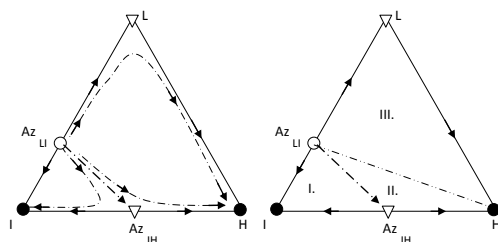
Tart.	I.	II.
SZR	$Az_{LI}-I-H$	$Az_{LI}-L-H$
SZSZ	$H-I-Az_{LI}$	$H-L-Az_{LI}$

1. táblázat 1-0-0 elegy SZR és SZSZ tartományai

4.2 2.0-2b típusú elegy elválasztása

Az eredeti maradékgörbe térkép osztálya Serafimov szerint 2.0-2b (előfordulási valószínűsége 21%), N&M alapján pedig lehet 1-2-0 vagy 1-0-2

vagy 0-2-1 is (pl.: aceton(L)-etanol(I)-toluol(H), MEK(L)-etanol(I)-toluol(H), aceton(L)-metanol(I)-etil-acetát(H)).



4. ábra 1-2-0 elegy MGT vázlata és a SZR és SZSZ tartományai

Az L - I azeotrop instabil, az I és H csúcsok pedig stabil csomópontok (4. ábra). Az I - H azeotrop és L csúcs nyeregpontok. A maradékgörbe térkép két egyszerű desztillációs tartományt és három szakaszos rektifikáló és sztrippelő tartományt tartalmaz (2. táblázat).

Tart.	I.	II.	III.
SZR	Az_{LI} - Az_{IH} - I	Az_{LI} - Az_{IH} - H	Az_{LI} - L - H
SZSZ	I - Az_{IH} - Az_{LI}	H - Az_{IH} - Az_{LI}	H - L - Az_{LI}

2. táblázat 1-0-0 elegy SZR és SZSZ tartományai

Ha csak az egyik azeotrop a nyomásérzékeny, akkor az lehet

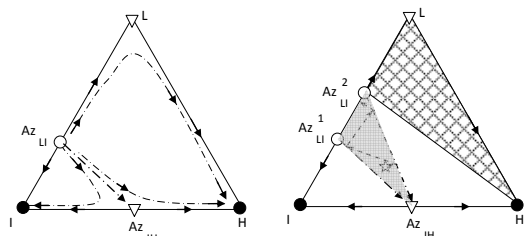
- az instabil csomópont (1P-2-0 vagy 1P-0-2 vagy 0-2-1P) vagy,
- nyeregpont (1-2P-0 vagy 1-0-2P vagy 0-2P-1)

Ugyanakkor mindkét azeotrop is lehet nyomásérzékeny.

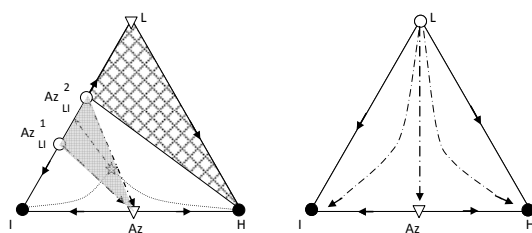
4.2.1 Csak egy azeotrop nyomásérzékeny

a. A nyomásérzékeny azeotrop instabil csomópont

A nyomás változtatásával a határvonal helyzete (Az_{IH} és Az_{LI} közötti egyenes, 5. ábra)) változik.



a) MGT vázlat P^1 -en b) tartály nyomvonal (SZSZ)



c) tartály nyomvonal (DOSZSZ) b) MGT vázlat P^3 -n

5. ábra 1P-2-0 elegy elválasztása

Javasolt kolonna konfiguráció: szakaszos sztrippel (5.b ábra) vagy a dupla oszlopos szakaszos sztrippel (5.c ábra).

Az elválasztás lépései:

0. (feltételes, ha a kiindulási összetétel a sötétített háromszögön kívül van). Kis mennyiségű I vagy H termék gyártása; DOSZSZ esetén csak az egyik oszlop működik,

1. H és I gyártása felváltva SZSZ-ben (5.b ábra, a tartály-nyomvonal szaggatott vonallal jelölve) vagy egyidejűleg DOSZSZ-ben (5.c ábra, a kolonna profil pontozott vonallal jelölve). SZSZ esetén ez a lépés több részből áll és többszöri nyomásváltást igényel.

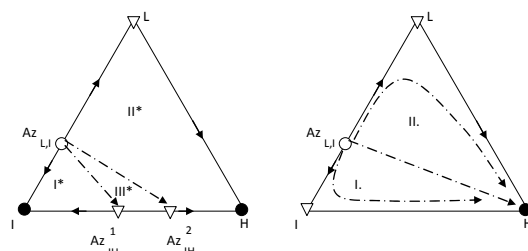
2. L és I gyártása nyomásváltó desztillációval.

Ha kiindulási összetétel a III. SZSZ tartományban (sraffozott terület a 5.b ábrán) van, akkor az első gyártási lépésnél H teljes mennyiségét el tudjuk távolítani.

Meg kell jegyeznünk, hogy a nyomás változtatásával (pl.: P^3 nyomáson) az L - I azeotrop el is tűnhet (5.d ábra). Ebben az esetben a MGT besorolása megváltozik (S: 1.0-2, M&N: 0-2-0). A javasolt kolonna konfigurációk megegyeznek a fentiekkel. Ebben az esetben az L / I elválasztáshoz (P^3 -on) nem szükséges nyomásváltás.

A háromszög egész területe megvalósítható.

A nyomásérzékeny azeotrop nyeregpont



6. ábra Nyomásérzékeny SZR/SZSZ tartományok (a) és MGT vázlat az Az_{IH} azeotrop megszűnése után (b) (1-2P-0 elegy)

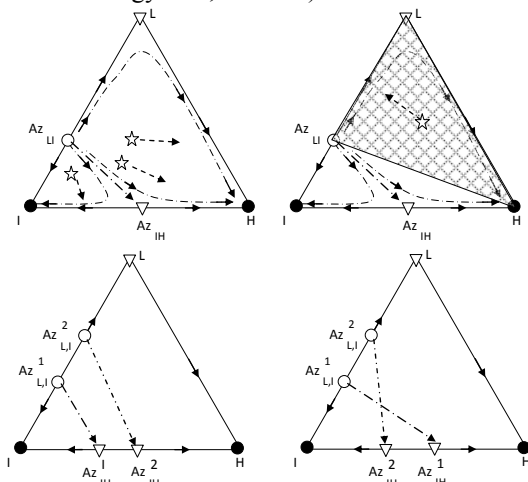
A nyomás változtatásával a határvonal (Az_{LI} és Az_{IH} közötti vonal) helyzete megváltozik (6. ábra). Az egész háromszög területe nem megvalósítható, mert

mindkét SZR és SZSZ tartományban visszkapjuk az eredeti L - I azeotropot (SZR-ben desztillátumként, SZSZ-ben pedig maradékként).

Még ha az I - H azeotrop meg is szűnik a nyomás változtatásával (MGT új besorolása M&N: 1-0-0, S:1.0-1a, 6.b ábra) az L / I elválasztás nem megvalósítható marad.

4.2.1 Mindkét azeotrop nyomásérzékeny

Ebben az esetben két határvonal helyzete változik a nyomás változtatásával (7. ábra). Két eset lehetséges. A nyomás változtatásával a két azeotrop - azonos irányba (pl. I csúcstól mindkettő távolodik, 7.c ábra) vagy, - ellenkező irányba (pl. az egyik távolodik I csúcstól, a másik pedig közeledik ahhoz, ekkor a határvonalak keresztezik egymást, 7.d ábra) mozdulhat el.



7. ábra 1P-2P-0 elegy elválasztása

- a. Megvalósítható tartály-nyomvonal SZR
- b. Megvalósítható tartály-nyomvonal SZSZ
- c. A határvonal elmozdulása P változásával (azonos irány)
- d. A határvonal elmozdulása P változásával (ellentétes irány)

Javasolt elválasztási eljárás:

1. Az L - I azeotrop eltávolítása SZR-ban. (Ez az azeotrop nyomásérzékeny, így szétválasztható L és I komponenseire nyomásváltó desztillációval SZSZ-ben vagy DOSZSZ-ben (7.a ábra).) A maradék lehet I - H vagy L - H elegy. Az L - H elegy zeotrop, így nyomásváltás nélkül is szétválasztható SZR-ben, vagy SZSZ-ben. Az I - H elegy pedig nyomásváltással választható szét SZSZ-ben vagy DOSZSZ-ben.

2. Ha kiindulási összetétel a III. SZSZ tartományban van (sraffozott terület a 7.b ábrán), akkor az első gyártási lépésnél H teljes mennyiségét el tudjuk távolítani SZSZ-ben. A tartályban maradó L - I elegy pedig szétválasztható nyomásváltással SZSZ-ben vagy DOSZSZ-ben.

A háromszög egész területe megvalósítható.

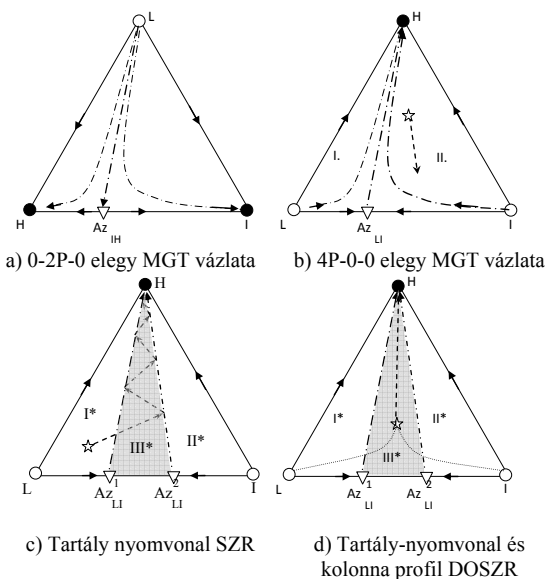
4.3 Maximális forrpontú azeotrop elegyek elválasztása

Eddig csak minimális forrpontú azeotropot tartalmazó elegyeket mutattunk be, habár a javasolt elválasztási eljárás alkalmazható a maximális forrpontú azeotropokra is a következő változtatásokkal.

A stabil és instabil csomópontok felcserélésével a megvalósíthatóság nem változik, csak a javasolt az elválasztási eljárásban a kolonna konfigurációt ki kell cserélni: SZSZ helyett SZR és DOSZSZ helyett DOSZR alkalmazandó (és fordítva).

Például tekintsük az 1.0-2 Serafimov besorolását maradékgörbe térképet. Ha minimális forrpontú nyomásérzékeny azeotropot tartalmaz az elegy, a kiterjesztett M&N osztály: 0-2P-0 (8.a ábra). A javasolt elválasztási eljárás: SZSZ és DOSZSZ.

Ha felcseréljük a stabil és instabil csomópontokat, akkor a kiterjesztett M&N osztály 4P-0-0 lesz (8.b ábra) és a javasolt kolonna konfiguráció a SZR (8.c ábra) és a DOSZR (8.d ábra).



8. ábra Maximális forrpontú azeotrop elegy elválasztása

5. Összefoglalás

A leggyakoribb, homoazeotropot tartalmazó háromkomponensű elegyek szakaszos nyomásváltó desztillációval való szétválaszthatóságát vizsgáltuk meg. Összesen 5 különböző Serafimov osztályú elegyet vizsgáltunk, melyek 11 Nishimura és Matsuyama (N&M) osztálynak felelnek meg. Figyelembe véve az azeotropok nyomásérzékenységeinek lehetőségét, 41 különböző esetet különböztettünk meg a kiterjesztett N&M besorolás

alapján. Ebből a 41 vizsgált esetből az összetétel-háromszögnek:

- egész területe megvalósítható 14 esetben,
- van olyan területe, ahol az elválasztás megvalósítható, 15 esetben,
- nincs megvalósítható (belső) tartománya 12 esetben.

Megállapítottuk, hogy összetétel háromszögnek akkor van megvalósítható területe, ha

- mindkét csomópont instabil és
- a határvonal a stabil csomópont(ok) és nyeregpont(ok) között nyomásérzékeny.

Továbbá megállapítottuk, hogy ha egy szakaszos rektifikáló vagy sztrippelő tartományban a termékek csak tiszta komponensek és/vagy nyomásérzékeny binér azeotropok, akkor az a tartomány megvalósítható.

Serafimov, L.A. (1970). The Azeotropic Rule and the Classification of Multicomponent Mixtures VII. Diagrams for Ternary Mixtures. *Russ. J. Phys. Chem.* 44(4), 567-571

Köszönetnyilvánítás

Munkákat az OTKA (projekt szám: T-049184) és a MTA Bolyai János ösztöndíja támogatja

Irodalom

- Abu-Eishah S. I., Luyben W. L. (1985), Design and Control of Two-Column Azeotropic Distillation System, *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev.* 24, 132-140
- Black C. (1980), Distillation Modelling of Ethanol Recovery and Dehydration Processes for Ethanol and Gasahol, *Chem. Eng. Prog.*, 76, 78-85,
- Chang T., Shih T. T. (1989), Development of an Azeotropic Distillation Scheme for Purification of Tetrahydrofuran, *Fluid Phase Equilib.*, 52, 161, 161-168.
- Bernot Ch., M. Doherty, M. F. Malone, (1991). Feasibility and Separation Sequencing in Multicomponent Batch Distillation, *Chem. Eng. Sci.*, 46, 1311
- Knapp J.P. and M.F. Doherty, (1992). A new pressure swing-distillation process for separating homogeneous azeotropic mixtures, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 346-357.
- Matsuyama, H., H. Nishimura, (1977). "Topological and Thermodynamic Classification of Ternary Vapor-Liquid Equilibria", *J. Chem. Eng. Japan*, 10, 181.
- Modla G. and Lang P. (2008a). Feasibility of new pressure swing batch distillation methods, *Chem. Eng. Sci.*, 63 (11) 2856-2874.
- Modla G., Láng P., (2008b) „Azeotropokat tartalmazó terner elegy elválasztása szakaszos nyomásváltó desztillációval”, *Műszaki Kémiai Napok 08*, ISBN-978-963-9696-36-5, 71-76.
- Modla G., P. Lang and A. Kopasz, (2008c) Entrainer selection for pressure swing batch distillation, *ESCAPE-18, 6 pages in CD*, ISBN 978-0-444-53228-2.
- Phimister, J.R.; Seider, W.D. (2000). Semicontinuous, Pressure Swing Distillation, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, 122-130.
- Repke J. U., Klein A., Bogle D., Wozny G., (2007). Pressure Swing Batch Distillation for Homogenous Azeotropic Separation, *ChERD* 85 (4) 152, 492-501
- Reshetov, S. A. (1998). Private communications: Karpov Institute of Physical Chemistry.